

**BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND****PRIORITY  
DOCUMENT**SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

EP04/3320

REC'D 14 MAY 2004

WIPO

PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung****Aktenzeichen:** 103 18 590.9**Anmeldetag:** 24. April 2003**Anmelder/Inhaber:** Siemens Aktiengesellschaft, 80333 München/DE**Bezeichnung:** Verfahren und Anordnung sowie Computerprogramm  
mit Programmcode-Mitteln und Computerprogramm-  
Produkt zur Ermittlung einer ausgewählten Position  
einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem  
Kommunikationsnetz**IPC:** G 01 S 5/02**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**München, den 14. April 2004  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
Der Präsident  
im Auftrag

Sieck

BEST AVAILABLE COPY

## Beschreibung

Verfahren und Anordnung sowie Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln und Computerprogramm-Produkt zur Ermittlung einer ausgewählten Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz

Die Erfindung betrifft eine Ermittlung einer Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz (Lokalisierung).

Mit zunehmender Verbreitung mobiler Kommunikation nimmt auch eine Nachfrage nach zusätzlichen Dienstleistungen, sogenannten „services“, bei Mobilfunksystemen zu.

Unter „Location Based Services“ werden dabei zusätzliche Dienstleistungen von Mobilfunkbetreibern verstanden, welche Nutzern von den Mobilfunksystemen ortsgebunden, d.h. abhängig von einer Position oder einem Standort des jeweiligen Nutzers, angeboten bzw. bereitgestellt werden, beispielsweise orts- oder entfernungsabhängige Nutzungstarife oder Orientierungshilfen für Rettungseinsätze oder Suchdienste.

Grundlegend für einen „Location Based Service“ ist demzufolge eine Lokalisierung oder Positionsermittlung des jeweiligen Nutzers bzw. dessen mobilen Kommunikationsgeräts.

Für eine solche Lokalisierung von mobilen Kommunikationsgeräten in Kommunikationsnetze sind verschiedene Techniken bekannt, beispielsweise eine Positionsermittlung auf Basis einer Laufzeitbestimmung bzw. Laufzeitmessung von Kommunikationssignalen von einem mobilen Kommunikationsgerät zu einer Basisstation eines Kommunikationsnetzes ([1], [2]) oder eine Lokalisierung mittels satellitengestützter Systeme, wie ein GPS.

Das aus [2] bekannte, Laufzeit basierte Positionsermittlungs-  
verfahren wird für ein Mobiltelefon, im allgemeinen einer Mo-  
bilstation, in einem GSM-Kommunikationsnetz (= Global System  
5 for Mobile Communications) ([7], [8], [9]) gemäß einer TDMA-  
Mobilfunk-Technik (Time Division Multiple Access-Mobilfunk)  
durchgeführt.

10 Einer einzelnen Mobilstation, die sich bei einer ortsfesten  
Basisstation (gesprächsführenden Basisstation) eingebucht  
hat, wird bei dieser eine derzeit freie Zeitlage in einem  
TDMA-Rahmen zugeteilt.

15 Zu dieser Zeitlage gehen die für die betreffende Mobilstation  
bestimmten Kommunikationssignale in Signalpaketen, sogenann-  
ten bursts, mit einer Länge von 15/26ms von der Basisstation  
ab, beziehungsweise müssen die von der Mobilstation gesende-  
ten Kommunikationssignale bzw. bursts an der Basisstation  
eintreffen.

20 Die von der Basisstation emittierten Kommunikationssignale  
finden ihren Weg zur Mobilstation aufgrund von Streuungen ü-  
ber unterschiedliche Wege (Mehrfachausbreitungen), wobei sie  
frequenzabhängig gedämpft werden.

25 Eine Empfangsfeldstärke der von der Mobilstation empfangenen  
Kommunikationssignale ist somit nicht nur von einer Entfer-  
nung der Mobilstation von der Basisstation, sondern auch von  
der Frequenz und topographischen Gegebenheiten zwischen Mo-  
30 bilstation und Basisstation abhängig. Deshalb werden die ein-  
zelnen Datenpakete auf verschiedenen Trägerfrequenzen ver-  
schickt, wodurch selektive Störungen einer Frequenz auf meh-  
rere Teilnehmer verteilt werden können.

Dafür ist allerdings eine präzise Synchronisierung zwischen Mobilstation und Basisstation notwendig. Diese Synchronisierung wird durch eine Mobilität eines Nutzers zusätzlich erschwert, weil die Mobilstation sich nun in sich ändernden  
5 Entfernungen zur Basisstation befindet und ihre Kommunikationssignale unterschiedliche Laufzeiten aufweisen.

Um die unterschiedlichen Laufzeiten auszugleichen und der Basisstation rahmensynchrone Daten liefern zu können, misst die  
10 Mobilstation die Signallaufzeit zur Basisstation und korrigiert dadurch einen Sendebeginn ihrer bursts.

Die Signallaufzeit wird in einem sogenannten „timing advance“ (TA) codiert und weist eine Abhängigkeit zur Entfernung zwischen Mobilstation und gesprächsführenden Basisstation auf.  
15

Für das TA stehen 64 Stufen zur Verfügung, die mit Werten 0 bis 63 (bit-)codiert werden und die Laufzeit repräsentieren.

20 Da Positionen von Basisstationen bekannt sind, kann aus einem TA bzw. aus der Signallaufzeit auf die Position der Mobilstation geschlossen werden.

Eine Messgenauigkeit bei der Laufzeitbestimmung beträgt eine Bitdauer, also in GSM 48/13  $\mu$ s, was einer einfachen Weglänge von etwa 554m entspricht.  
25

Aus [3] ist eine Positionsermittlung einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem UMTS-Netz (= Universal Mobile Telecommunication System-Netz) bekannt.  
30

Bei dem entsprechenden UMTS- Mobilfunkstandard, auf welchem das UMTS-Netz basiert, ist eine Positionsermittlung eines Mobilfunkgerätes bereits explizit im Standard enthalten bzw.  
35 wird durch diesen gefordert (TS 25.305 V3.1.0: stage 2 „Func-

tional Specification of Location Services in UTRAN" (release 99), 3GPP TSG-RAN-WG2, 2000).

5 Aus [4], [5] und [6] sind weitere Verfahren zur Lokalisierung einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz bekannt.

Aus [10] ist ein nichtlineares Filter, ein Prior Density Splitting Mixture Estimator (PDSME), bekannt.

10

Dieses nichtlineare Filter, dieser PDSME, basiert auf neue Gaussche Mischfilter-Algorithmen für nichtlineare Systemzustandsgleichungen und/oder nichtlineare Messgleichungen.

15 Üblicherweise treten Linearisierungsfehler auf, wenn die nichtlinearen Systemzustandsgleichungen und/oder die nichtlinearen Messgleichungen durch Linearisierungen ersetzt werden bei Anwendung von linearen Filtertechniken.

20 Der PDSME bewirkt eine Reduktion dieser Linearisierungsfehler durch Splitten der a priori Dichte in mehrere Gaussche Mischkomponenten mit jeweils kleineren Kovarianzen.

25 Der PDSME kann angewandt werden sowohl für einen sogenannten „Prediction Step“ bei den nichtlinearen Systemzustandsgleichungen als auch für einen sogenannten „Filter Step“ bei den nichtlinearen Messgleichungen.

30 Weiter ist aus [10] bekannt eine Messung für den Linearisierungsfehler, die vergleichbar einer Kullback-Leibler-Distanz ist. Darüber kann eine gewünschte Abschätzungsgüte bei dem PDSME eingestellt werden. Durch Beschränkung einer maximalen Anzahl von Mischkomponenten bei dem PDSME kann eine obere Grenze für einen Rechenaufwand angegeben werden.

Die genannten Lokalisierungsverfahren weisen unter anderem die Nachteile auf, dass die durch sie ermittelten Positionen der mobilen Kommunikationseinrichtungen ungenau und demzufolge mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Genauere Verfahren erfordern allerdings aufwendige Zusatzeinrichtungen und kostspielige Modifikationen an den bzw. der Kommunikationsnetze und Kommunikationseinrichtungen.

Somit liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine genaue und mit möglichst geringen Unsicherheiten behaftete Lokalisierung einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz zu ermöglichen, welche möglichst einfach und kostengünstig realisiert werden kann.

Diese Aufgaben werden durch das Verfahren und die Anordnung sowie durch das Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln und das Computerprogramm-Produkt zur Ermittlung einer ausgewählten Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz mit den Merkmalen gemäß dem jeweiligen unabhängigen Patentanspruch gelöst.

Bei dem Verfahren zur Ermittlung einer ausgewählten Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz mit mindestens einer ersten Basisstation, eingerichtet zu einer ersten Kommunikation mit der mobilen Kommunikationseinrichtung mittels erster Kommunikationssignale, wird ein nichtlineares Kommunikationsmodell mit einem deterministischen Anteil und einem stochastischen Anteil verwendet.

Dieses nichtlineare Kommunikationsmodell umfasst einen deterministischen und einen stochastischen Anteil

- welcher deterministische Anteil eine Abhängigkeit zwischen Kommunikationssignale einer Basisstation und Positionen der mobilen Kommunikationseinrichtung beschreibt und

- welcher stochastische Anteil eine Unsicherheit des deterministischen Anteils beschreibt.

5 Unter Verwendung des zu der ausgewählten Position zugehörigen ersten Kommunikationssignals der ersten Basisstation und dem nichtlinearen Kommunikationsmodell wird die ausgewählte Position ermittelt, wobei bei der Ermittlung eine nichtlineare Bayesianische Filtertechnik angewandt wird.

10 Durch Anwendung der nichtlinearen Bayesianische Filtertechnik auf das Kommunikationsmodell bzw. auf das Kommunikationssignal wird ein mögliches Aufenthaltsgebiet der ausgewählten Position bestimmt, aus welchem schließlich die ausgewählte Position bestimmt wird.

15 Unter der nichtlinearen Bayesianischen Filtertechnik bei der Erfindung ist im allgemeinen die Technik wie folgt zu verstehen:

- die Bayesianische Filtertechnik entspricht einer zeitlichen Fortschreibung bzw. Veränderung (auch Berechnung der zeitlichen Veränderung) bekannter Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Systemzustände und Systemausgänge durch das Vorliegen neuer Messwerte.

25 Dem erfinderischen Lokalisierungsverfahren liegt die Idee zugrunde, aus in Kommunikationsnetzen, wie zum Beispiel WLAN, GSM, DECT-Netzen, zur Verfügung stehenden Kommunikationssignalen zwischen mindestens einer Basisstation (Sender) und einer Mobilstation (Empfänger) entfernungsrelevante Parameter  
30 und daraus geographische Informationen, in diesem Fall ein mögliches Aufenthalts- oder Entfernungsgebiet bzw. Unsicherheitsgebiet der Mobilstation, zu gewinnen.

Anzumerken ist, dass Sender und Empfänger der Kommunikationssignale technisch auch vertauscht realisiert sein können. Die  
35

erfinderische Vorgehensweise bleibt davon unberührt. In diesem Fall wäre die Basisstation der Empfänger und die Mobilstation der Sender der in Rede stehenden Kommunikationssignale.

5

Weiter liegt der dem erfinderischen Lokalisierungsverfahren die Erkenntnis zugrunde, dass die von der Mobilstation empfangenen Kommunikationssignale abhängig sind von der geographischen Position der Mobilstation im Kommunikationsnetz bzw. zu der Basisstation.

10

Diese Abhängigkeit zwischen den empfangenen Kommunikationssignalen bzw. zwischen Signalstärken der (von der Basisstation) empfangenen Kommunikationssignale und der geographischen Position der Mobilstation kann durch sogenannte Messgleichungen, d.h. durch das Kommunikationsmodell, beschrieben werden.

15

Diese Messgleichungen bzw. das Kommunikationsmodell umfassen einen deterministischen Anteil, welcher deterministische Anteil eine Abhängigkeit zwischen dem empfangenen Kommunikationssignal und der Position der Mobilstation beschreibt, und einen stochastischen Anteil, welcher stochastische Anteil eine Unsicherheit des deterministischen Anteils beschreibt.

20

Diese Unsicherheit kann beispielsweise eine solche des Kommunikationssignals und/oder eine solche der erwähnten Abhängigkeit (Modellunsicherheit) sein.

Die erfindungsgemäß auf diese Messgleichungen bzw. das Kommunikationsmodell angewandte nichtlineare Bayesianische Filtertechnik zur Bestimmung des möglichen Aufenthaltsgebiets der Mobilstation bzw. der ausgewählten Position verbessert die Qualität der Lokalisierung verglichen mit üblichen Filtertechniken wie einem Extended Kalman Filter (EKF) erheblich.

30

35



Die Anwendung der nichtlinearen Bayesianischen Filtertechnik kann in einem sogenannten „Filter Step“ einmalig oder iterativ mehrmalig erfolgen.

- 5 In diesem möglichen Aufenthaltsgebiet bzw. Unsicherheitsgebiet, beschrieben unter Verwendung stochastischer Größen, wie einem Mittelwert und/oder einer Varianz, wird schließlich die Mobilstation bzw. deren Position vermutet.
- 10 Diese Vermutung kann mathematisch formuliert werden durch einen Kennwert des möglichen Aufenthalts- bzw. Unsicherheitsgebiets, wie einem Schwerpunkt oder einem Erwartungswert. Dieser kann dann als Schätzung für die ausgewählte Position der Mobilstation verwendet wird.
- 15 Ein besonderer Vorteil der Erfindung liegt darin, dass die Lokalisierung auf Basis von Kommunikationssignalen und bekannten Positionen von Basisstationen durchgeführt wird, welche in einem normalen Betrieb bei einem Mobilfunksystem an-
- 20 fallen und dort zur Verfügung stehen. Dadurch kann auf aufwendige Änderungen und Erweiterungen sowie Zusatzmessungen bestehender Mobilfunksysteme bzw. bei bestehenden Mobilfunksystemen verzichtet werden.
- 25 Das Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln ist eingerichtet, um alle Schritte gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Ermittlung einer Position, d.h. dem erfindungsgemäßen Lokalisierungsverfahren, durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird.
- 30 Das Computerprogramm-Produkt mit auf einem maschinenlesbaren Träger gespeicherten Programmcode-Mitteln ist eingerichtet, um alle Schritte gemäß dem erfindungsgemäßen Lokalisierungsverfahren durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer
- 35 ausgeführt wird.

Die Anordnung sowie das Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln, eingerichtet um alle Schritte gemäß dem erfinderischen Lokalisierungsverfahren durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird, sowie das Computerprogramm-Produkt mit auf einem maschinenlesbaren Träger gespeicherten Programmcode-Mitteln, eingerichtet um alle Schritte gemäß dem erfinderischen Lokalisierungsverfahren durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird, sind insbesondere geeignet zur Durchführung des erfindungsgemäßen Lokalisierungsverfahrens oder einer seiner nachfolgend erläuterten Weiterbildungen.

Bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Die im weiteren beschriebenen Weiterbildungen beziehen sich sowohl auf die Verfahren als auch auf die Anordnung.

Die Erfindung und die im weiteren beschriebenen Weiterbildungen können sowohl in Software als auch in Hardware, beispielsweise unter Verwendung einer speziellen elektrischen Schaltung, realisiert werden.

Ferner ist eine Realisierung der Erfindung oder einer im weiteren beschriebenen Weiterbildung möglich durch ein computerlesbares Speichermedium, auf welchem das Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln gespeichert ist, welches die Erfindung oder Weiterbildung ausführt.

30

Auch kann die Erfindung oder jede im weiteren beschriebene Weiterbildung durch ein Computerprogrammerzeugnis realisiert sein, welches ein Speichermedium aufweist, auf welchem das Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln gespeichert ist,

welches die Erfindung oder Weiterbildung ausführt.

Bei einer Kommunikation in einem Kommunikationsnetz zwischen einer mobilen Kommunikationseinrichtung (Mobilstation), beispielsweise einem Mobiltelefon, und einer Basisstation, beispielsweise einer Rundantenne bzw. einem Rundstrahler oder einer bzw. mehrerer sektoraler Antennen, werden Daten, die Kommunikationssignale, in Signalpaketen, sogenannten bursts, übertragen.

10 Basierend auf den bzw. unter Verwendung der übertragenen Kommunikationssignalen bzw. Signalpaketen lassen sich verschiedene entfernungsrelevante Parameter ermitteln, welche wiederum als Grundlage für die Ermittlung von den möglichen Aufenthalts- bzw. Entfernungsgebieten herangezogen werden können.

15 Ein solcher entfernungsrelevanter, d.h. entfernungsabhängiger, Parameter ist beispielsweise eine Feldstärke eines Signalpakets.

20 Die Feldstärke weist eine natürliche Abhängigkeit zur Entfernung zwischen der Mobilstation und der (gesprächsführenden) Basisstation auf und liefert demzufolge eine Information über das mögliche Aufenthaltsgebiet bzw. Entfernungsgebiet (Unsicherheitsgebiet) der Mobilstation.

25 Diese Abhängigkeit zwischen Feldstärke und Entfernung kann durch physikalische Modelle, welche ein Ausbreitungsverhalten von Signalen beschreiben, beschrieben werden.

30 Für die Ermittlung der ausgewählten Position kann ein Kennwert des möglichen Aufenthalts- bzw. Unsicherheitsgebiets bestimmt werden, wie ein Schwerpunkt oder ein Erwartungswert, welcher dann als Schätzung für die ausgewählte Position der Mobilstation verwendet wird.

35

Die Qualität der Lokalisierung kann weiter verbessert werden unter Verwendung eines Benutzermodells, welches eine Bewegung der mobilen Kommunikationseinrichtung beschreibt. So kann ein solches Benutzermodell eine maximale Schrittweite bzw. Bewegungsdistanz für einen vorgegebenen Zeitschritt begrenzen.

Die Erfindung eignet sich insbesondere zu einem Einsatz im Umfeld eines digitalen, zellularen Mobilfunksystems, wie eines GSM-Netzes, und dort beispielsweise zur Lokalisierung eines GSM-Telefons (Mobiltelefon).

Dabei werden bei dem Einsatz der Erfindung nur die dem Mobiltelefon zur Verfügung stehenden Daten verwenden, wobei weder am GSM-Netz noch an Mobilstationen in dem GSM-Netz kostspielige Änderungen vorzunehmen sind.

Beispielsweise sind bekannt von einem GSM-Netz die Positionen der einzelnen Basisstationen und deren Antennen sowie deren Charakteristika, welche Auskunft über das Versorgungsgebiet der jeweiligen Antenne gibt.

Das Mobiltelefon seinerseits steht für einen korrekten Verbindungsaufbau immer in Kontakt mit den empfangbaren Antennen, um die am besten für ein Gespräch geeignete Antenne vom Netz zugeteilt zu bekommen. Dazu misst es unter anderem die Empfangsfeldstärke der empfangbaren Antennen sowie bestimmt Signallaufzeiten, die dann ebenfalls bekannt sind.

Auf Basis dieser vorliegenden Informationen erfolgt dann die Lokalisierung des Mobiltelefons gemäß der erfinderischen Vorgehensweise.

Auch eignet sich die Erfindung zu einem Einsatz im Umfeld weiterer digitaler, zellularen Mobilfunksysteme, wie eines

WLAN oder eines DECT-Netzes [11], und dort beispielsweise zur Lokalisierung eines DECT-Mobiltelefons.

In Figuren ist ein Ausführungsbeispiel der Erfindung dargestellt, welches im weiteren näher erläutert wird. Das Ausführungsbeispiel ist dabei unterteilt in einen grundlegenden Teil, welcher Grundlagen der erfinderischen Vorgehensweise darstellt, und einen angewandten Teil, welcher anhand eines konkreten Zahlenbeispiels die erfinderische Vorgehensweise sowie Ergebnisse verdeutlicht bzw. angibt.

Es zeigen

Figur 1 eine Skizze, in welcher eine angenommene lineare Näherung für das nichtlineare Kommunikationsmodell dargestellt ist;

Figur 2 eine Skizze, in welcher die Unsicherheit der Kommunikationssignale durch rauschen dargestellt ist;

Figur 3 eine Skizze, in welcher ein Überblick über den PDSME-Algorithmus mit einem linearisierten Filterstep (oberer Ausschnitt) und einem Prognoseschritt (Prediktionsstep) (unterer Ausschnitt) dargestellt ist;

Figuren 4a und b Skizzen, in welchen ein Evaluierungsszenario für die Lokalisierung gemäß dem Ausführungsbeispiel dargestellt ist;

Figuren 5a und b Skizzen, in welchen eine Lokalisierung unter Verwendung eines Extended Kalman Filters dargestellt ist (erster Filterschritt Fig. 5a; 170-ter Filterschritt Fig. 5b);

Figuren 6a und b Skizzen, in welchen eine Lokalisierung unter Verwendung des PDSME gemäß dem Ausführungsbeispiel dargestellt ist (erster Filterschritt Fig. 6a; 170-ter Filterschritt Fig. 6b;

5

Figuren 7a und b Skizzen, in welchen Ergebnisse der EKF-Filterung und der PDSME-Filterung gemäß dem Ausführungsbeispiel in Bezug auf die korrekten Ergebnisse dargestellt sind;

10

Figur 8 eine Skizze, in welcher eine Anzahl von Gausschen Mischkomponenten in einer Abhängigkeit von Filterschritten dargestellt sind.

15

**Ausführungsbeispiel: Lokalisierung eines DECT-Mobiltelefons in einem DECT-Netz basierend auf einer nichtlinearen Filtertechnik**

## 20 1. Grundlagen

Nachfolgend wird die Anwendung einer nichtlinearen Bayesianischen Filtertechnik bei der Lokalisierung eines mobilen Funktelefons beschrieben. Die Anwendung wird beschrieben am Beispiel einer Lokalisierung eines DECT-Mobiltelefons in einem DECT-Netz mit mehreren Basisstationen.

30

Signalstärken (Feldstärken) der von einem Mobiltelefon empfangenen und dort gemessenen Kommunikationssignale (einer diese Signale aussendenden Basisstation) sind abhängig von der Position des Mobiltelefons bezüglich der die Kommunikationssignale aussendenden Basisstation. Dieser Zusammenhang wird beschrieben durch nicht lineare Messgleichungen (nichtlineares Kommunikationsmodell).

35

Diese nicht linearen Messgleichungen bzw. dieses nicht lineare Kommunikationsmodell umfasst einen deterministischen Anteil, welcher die empfangenen Signalstärken als Funktion der Position beschreibt, und einen stochastischen Anteil, welcher  
5 Modellfehler und Messrauschen berücksichtigt.

Zusätzlich werden Benutzermodelle mit berücksichtigt, welche ein Wissen über eine (räumliche) Bewegung von Benutzern der Mobiltelefone mit einbringen.

10

Eine neue nichtlineare Filtertechnik, ein sogenannter „Prior Density Splitting Mixture Estimator“ (PDSME), einordnbar als  
Gausscher Mischfilteralgorithmus, verbessert signifikant eine  
Lokalisierungsqualität verglichen mit Standardfiltertechni-  
15 ken, wie ein „Extended Kalman Filter“ (EKF) (vgl. Figuren 5 bis 7).

Typische Anwendungen für Lokalisierungsaufgaben sind Positionsermittlungen mobiler Kommunikationseinrichtungen (Mobilgeräten) in WLANs, GSM-Netzen oder DECT-Netzen.  
20

Für die Positionsermittlung sollten dabei Informationen verwendbar sein, welche bereits während einer normalen Operationsphase, d.h. bei einer „normalen“ Kommunikation zwischen  
25 Mobilgerät und Basisstation, zur Verfügung stehen.

Das aus [12] bekannte Lokalisierungsverfahren für Mobiltelefone in GSM-Netzen basiert auf ortsabhängige, von den Mobiltelefonen empfang- und dort messbare Signalstärken der von  
30 Basisstationen ausgesendeten Kommunikationssignale. Wegen der Ortsabhängigkeit sind diese charakteristisch für die Position des Signalempfängers, in diesem Fall für die Position des Mobiltelefons bzw. eines Benutzers des Mobiltelefons.

35 Während der normalen Operationsphase werden die empfangenen Signalstärken aller empfangbarer Kommunikationssignale der jeweiligen Sender (Basisstationen) durch das Mobiltelefon ge-

messen und verglichen. Dadurch wird ein sogenanntes Handover des Mobiltelefons zwischen verschiedenen Sendern bzw. Basisstationen gesteuert.

- 5 Basierend auf diese im Normalbetrieb anfallenden Messungen können Lokalisierungsverfahren entwickelt werden, um zusätzlich die Position des Mobiltelefons in Bezug auf die Sender bzw. im GSM-Netz zu ermitteln.
- 10 Aus [13] und [17] sind weitere Vorgehensweisen zur Lokalisierung mobiler Kommunikationseinrichtungen bekannt. Diese Vorgehensweise bei der Lokalisierung basieren auf einer Anwendung von nichtlinearen Zustandsschätzungen.
- 15 Nachfolgend wird die Anwendung einer neuen nichtlinearen Filtertechnik für die Lokalisierung von DECT-Mobiltelefonen beschrieben.
- 20 Um die Lokalisierung von Mobiltelefonen zu ermöglichen, wird, wie aus [18] bekannt ist, ein stochastisches Näherungsmodell für die Ausbreitung von Radiowellen oder empfangbaren Signalstärken von Kommunikationssignalen in einer Lokalisierungsumgebung identifiziert bzw. entwickelt.
- 25 Ein entsprechendes Ausbreitungsmodell kann auch grundsätzlich durch physikalische Ausbreitungsmodelle von elektromagnetischen Wellen erlangt werden.
- 30 Eine Anpassung rein physikalischer Ausbreitungsmodelle an reale (Lokalisierungs-)Umgebungen ist jedoch sehr kompliziert, da Reflexionen oder Interferenzen oder andere physikalische Phänomene die physikalisch angenommene Ausbreitung beeinflussen und verfälschen.
- 35 Da reale Ausbreitungsparameter, welche die elektromagnetischen (Ausbreitung-)Eigenschaften in der realen Lokalisierungsumgebung, in welcher das Mobiltelefon zu lokalisieren



ist, beschreiben, nur partiell bekannt bzw. bestimmbar sind, ist die Anwendung solcher physikalisch basierter Ausbreitungsmodelle für solche realen Anwendungen ausgeschlossen.

- 5 Deshalb ist ein Ausbreitungsmodell, welches auf tatsächlichen Messungen der (logarithmierten) empfangenen Signalstärken der Kommunikationssignale in der tatsächlichen Lokalisierungsumgebung beruht bzw. sich daraus ableiten lässt, theoretischen physikalischen Ausbreitungsmodellen vorzuziehen.

10

- Die Entwicklung eines solchen aus tatsächlichen Messungen abgeleitetes „Messmodell“ bzw. Kommunikation- bzw. Ausbreitungsmodell erfordert ein Einmessen oder eine Kalibrierung im Rahmen dessen Parameter des Messmodells festgelegt werden.

Einmessen/Kalibrieren („model generation phase“)

- 20 Für ein solches Einmessen/Kalibrieren wird der Empfänger (benutzt im Sinne eines Messgerätes), d.h. das Mobiltelefon, an mehrere Positionen in der Lokalisierungsumgebung bewegt, beispielsweise an Gitterpunkten erhältlich durch Platzierung eines Gitters auf die Lokalisierungsumgebung.

- 25 An jedem Gitterpunkt werden die Feldstärken aller dort empfangbaren Basisstationen gemessen und in einer Karte der Lokalisierungsumgebung gespeichert. Auf diese Weise wird die Feldstärkenverteilung jeder Basisstation über die Lokalisierungsumgebung bestimmt. Die Feldstärkenverteilungen können  
30 durch das Messmodell modelliert werden.

- Basierend auf diese Modellinformationen (und von an einer aktuellen Position gemessenen Feldstärken) kann dann die aktuelle, von einem Empfänger bzw. von dem Mobiltelefon in der Lokalisierungsumgebung eingenommenen Position bestimmt werden  
35 (Lokalisierung in einer „localisation phase“).

Weiter wird nachfolgend beschrieben werden, wie ein stochastisches Messmodell in der model generation phase identifizierbar ist.

5

Dieses stochastische Messmodell besteht aus einer analytischen, deterministischen Messfunktion, welche die logarithmierte, empfangene Signalfeldstärke in Abhängigkeit von Positionskoordinaten beschreibt. Darüber hinaus wird ein stochastischer Anteil (Komponente) identifiziert, welcher Modellunsicherheit wie auch Messrauschen berücksichtigt.

10

15

Ein solcher stochastischer Ansatz bei der Lokalisierung berücksichtigt die Unsicherheiten bei der ermittelten Position durch Wahrscheinlichkeiten bzw. Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen.

20

Neben dem Messmodell für die empfangbaren Kommunikationssignale wird die Güte der Lokalisierung dadurch weiter verbessert, dass ein Benutzermodell mit eingebracht wird. Über dieses Benutzermodell kann Wissen über eine (räumliche und/oder zeitliche) Bewegung eines Benutzers mit berücksichtigt werden.

25

Durch solche Benutzermodelle können maximale „Schrittweiten“ von Benutzern in einem Zeitschritt, welcher über zwei zugehörige bzw. korrespondierende Signalmessungen (am Anfang und am Ende des Zeitschritts) definiert wird, beschränkt ist.

30

Ein zusätzliche Verbesserung der Lokalisierungsgüte lässt sich erreichen durch rekursive Positionsermittlung durch Kombination mehrfacher verschiedener nacheinanderfolgender Messungen.

Der hier benutzte neue stochastische Ansatz bei der Lokalisierung führt zu nichtlinearen, mehrdimensionalen Messgleichungen. Eine exakte Lösung dieses Bayesianischen Filterproblems führt zu komplizierten nicht-Gausschen Wahrscheinlichkeitsdichten, welche die gesuchte Position mit ihren Unsicherheiten beschreiben.

Diese Wahrscheinlichkeitsdichte(-funktionen) können durch Gaussche Mischdichten [19], [20] angenähert werden.

10

Diese Annäherung wird hier durch einen neuentwickelten sogenannten „Prior Density Splitting Mixture Estimator“ (PDSME) durchgeführt, der entwickelt wurde, um eine durch einen Anwender einstellbare Güte der Lokalisierung zu ermöglichen – im Gegensatz zu üblichen, nichtlinearen, bekannten Filtertechniken, wie einem Extended Kalman Filter (EKF).

15

Jedoch kann eine Angabe einer oberen Grenze für einen Rechenaufwand durch Beschränkung der Anzahl von anwendbaren Gausschen Mischkomponenten die Lokalisierungsgüte reduzieren. Darüber hinaus wird durch die Repräsentation von Dichten bei den Gausschen Mischungen eine rekursive Vorgehensweise sowohl bei den nichtlinearen „Predictions Steps“ als auch bei den nichtlinearen „Filtersteps“ möglich.

20

Weiter wird im ersten Teil beschrieben werden, wie das stochastische Lokalisierungsproblem formuliert werden kann. Die deterministischen Anteile und die stochastischen Anteile des Messmodells werden nachfolgend erklärt werden. Die Anwendung von Bayesianischen Filteralgorithmen, basierend auf einer gausschen Mischnäherung für die exakten Wahrscheinlichkeitsdichten verwendet in dem neuen PDSME wird beschrieben werden.

25

Im zweiten Teil werden Ergebnisse einer Lokalisierung eines DECT-Mobiltelefons in einem DECT-Netz dargestellt und die Gü-

30

te der Lokalisierung unter Verwendung des PDMSE mit der unter Verwendung eines bekannten EKF verglichen werden.

### Formulierung des Lokalisierungsproblems

5

Die Lokalisierungsaufgabe für ein mobile Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz kann in zwei Grundprobleme eingeteilt werden:

- 1) die Identifikation des Messmodells mit einem deterministischen und einen stochastischen Anteil in der model generation phase;
- 2) die Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsdichte der gesuchten Position in einem Bayesianischen Filterstep in der Lokalisierungsphase.

15

### Das Messmodell

$$\hat{\underline{y}}_k = \begin{bmatrix} \hat{y}_{k,1} \\ \vdots \\ \hat{y}_{k,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(\underline{x}_k) \\ \vdots \\ h_N(\underline{x}_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} = \underline{h}(\underline{x}_k) + \underline{v}_k \quad (1)$$

beschreibt die Messung der logarithmierten empfangenen Signalstärken

$$20 \quad \hat{y}_{k,\zeta} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{k,\zeta}}{1\text{mW}} \right)$$

des  $\zeta$ -then Transmitters (Senders),  $\zeta = 1, \dots, N$ , als eine deterministische nichtlineare Funktion  $h_\zeta(\underline{x}_k)$  der Positionskordinaten  $\underline{x}_k = [x_{1,k}, x_{2,k}]$  für jeden der  $N$  verschiedenen Sender.

25

Der stochastische Anteil  $\underline{v}_k$  des Messmodells wird repräsentiert durch eine additive Unsicherheit. Additive Unsicherheiten im Messmodell der logarithmierten empfangenen Signalstärke entsprechen multiplikativen Unsicherheiten der Signalleistung  $P$ , welche auf einen Einfluss von unbestimmten Dämpfungen zurückzuführen sind.

30

Jeder Transmitter kann identifiziert werden über eine ihm eigenen ID, welche durch die Basisstation während einer Kommunikation übertragen wird.

- 5 Dadurch wird das Lokalisationsproblem erheblich vereinfacht, weil jeder Messwert direkt der zugehörigen nichtlinearen Messgleichung zugewiesen werden kann.

10 In der Lokalisierungsphase werden die nichtlinearen Filteralgorithmen in jedem Zeitschritt  $k$  angewandt. Jedoch können ohne die additiven Unsicherheiten  $v_k$  die impliziten, nichtlinearen Beziehungen zwischen dem Vektor mit den gemessenen logarithmierten empfangenen Signalstärken  $y_k$  der Transmitter und den Positionen  $x_k$  des Empfängers nur numerisch gelöst werden, 15 beispielweise durch eine Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Berücksichtigt man die Unsicherheiten mit, so können die Messgleichungen verwendet werden, um die gesuchte Position im Filterstep zu erneuern („update“).

- 20 Die weiter beschriebene Vorgehensweise bei der Lokalisierung basiert auf einer Näherung der exakten Lösung des bayesianischen Filtersteps durch Gaussche Mischdichten

$$f_x^p(\underline{x}_k) = \sum_{i=1}^L \omega_{x,k}^{p,i} \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \left\| \underline{x}_k - \underline{\mu}_{x,k}^{p,i} \right\|_{(C_{xx,k}^{p,i})^{-1}}^2\right)}{\sqrt{(2\pi)^2 |C_{xx,k}^{p,i}|}}$$

- mit  $L$  Komponenten, definiert durch nicht-negative Gewichte  $w$ , 25 Erwartungswerte  $\mu$  und Kovarianzen  $C$ .

Ist der Messwert  $y$  verfügbar, so ergibt sich die exakte Lösung des Bayesianische Filtersteps aus:

$$f_x^e(\underline{x}_k | \hat{y}_k, \zeta) = c f_x^p(\underline{x}_k) f_v(\zeta(\hat{y}_k, \zeta - h(\underline{x}_k)))$$

- 30 mit der nichtlinearen Messfunktion  $h(x)$ , den additiven Unsicherheitsdichtefunktionen  $f(v)$  und eine Normalisierungskonstante  $c$ .

A priori Wissen über die gesuchte Position wird repräsentiert durch die Dichtefunktion  $f(x)$ .

- 5 Für jede neue Messung wird die vorangehende a posteriori Dichte  $f(x|y)$  interpretiert als neue a priori Dichte, so dass die gesuchte bzw. ermittelte Position rekursiv erneuert (update) werden kann.
- 10 Analog zum Bayesianischen Filterstep wird ein Prediktionsstep, welcher zur Beschreibung des nichtlinearen Benutzermodells
 
$$\underline{x}_{k+1} = \underline{a}_k(\underline{x}_k) + \underline{w}_k \quad (2)$$
 verwendet wird, ebenso zur Näherung der exakten Dichte durch
 - 15 Gaussche Mischungen durchgeführt.

Die nichtlineare Funktion  $a(x)$  ist ein deterministisches Modell einer Benutzerbewegung. Unsicherheiten werden wieder durch additives Rauschen  $w$  berücksichtigt.

20

#### Stochastische Modellierung

- 25 Das Messmodell wird identifiziert über Messungen der logarithmierten Signalstärken für jeden Transmitter an Gitterpunkten eines Gitters,, welchen die Lokalisierungsumgebung abdeckt. Die deterministische ( $h(x)$ ) und die stochastische Komponente ( $v$ ) des Messmodells (1) werden vor der Lokalisierung identifiziert.

- 30 Der deterministisch, analytische Anteil  $h(x)$  ist eine Messgleichung, welche die empfangene Signalleistung als eine Funktion der Positionskoordinaten beschreibt. Der stochastische Anteil  $v$  ist ein Modell für die Unsicherheiten des deterministischen Anteils. Diese Unsicherheiten setzen sich

zusammen aus räumlichen Unsicherheiten entsprechend Modellfehlern und zeitliches Messrauschen.

## 5 Deterministisches Messmodell der logarithmierten empfangenen Signalstärken

Fig.1 zeigt, dass die Abnahme der logarithmierten, empfangenen Signalstärke über eine Distanz von mehreren Metern annähernd linear ist. In anderen Dokumenten werden ähnliche Annahmen bezüglich des Messmodells als „linear-loss-model“ [24] oder „linear-scope-model“ [18] bezeichnet.

Mathematisch lässt sich für zweidimensionale Positionskoordinaten  $\mathbf{x}$  richtungsabhängige lineare Abnahme der logarithmierten empfangenen Signalstärken beschreiben durch  $N$  unabhängige Messgleichungen

$$h_{\zeta}(\mathbf{x}_k) = -\sqrt{\|\mathbf{x}_k - \mathbf{m}_{\zeta}\|_{\mathbf{P}_{\zeta}}^2} + \Delta\zeta. \quad (3)$$

Die Parameter  $\mathbf{m}_{\zeta}$  und  $\mathbf{P}_{\zeta}$  der positiven semidefiniten quadratischen Form und der additive Offset  $\Delta\zeta$  werden für jeden Transmitter  $\zeta = 1, \dots, N$  identifiziert.

Die  $6N$  Parameter  $\mathbf{m}_{\zeta}$ ,  $\mathbf{P}_{\zeta}$  und  $\Delta\zeta$  werden bestimmt durch eine Methode der kleinsten Fehlerquadrate, bei welcher die Abweichung zwischen dem angenäherten Messmodell und der gemessenen logarithmierten Signalstärken auf den Gitterpunkte, gemessen während der model generation phase, minimiert wird. Zur Reduktion des zeitlichen Messrauschens wird der Mittelwert über mehrere Messungen an jedem Gitterpunkt zur Berechnung des Durchschnitts der gemessenen Werte verwendet.

30

## Stochastische Modellierung der Unsicherheiten

Das stochastische Unsicherheitsmodell berücksichtigt sowohl die Abweichung zwischen den angenäherten, im obigen beschrie-

benen Modell und der wahren Verteilung der logarithmierten empfangenen Signalstärken, gemessen auf den Gitterpunkten, und das zeitliche Messrauschen.

## 5 Modellunsicherheiten

Bei der beschriebenen Vorgehensweise wird die Abweichung zwischen den wahren logarithmierten empfangenen Signalstärken und dem deterministischen Messmodell  $h(x)$  beschrieben durch

10 Gaussche Rauschdichten mit entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen für jeden Transmitter. Diese Gaussche Unsicherheit ist eine Repräsentation für einen Näherungsfehler des deterministischen Anteils des Messmodells über die gesamte Lokalisierungsumgebung.

15

20



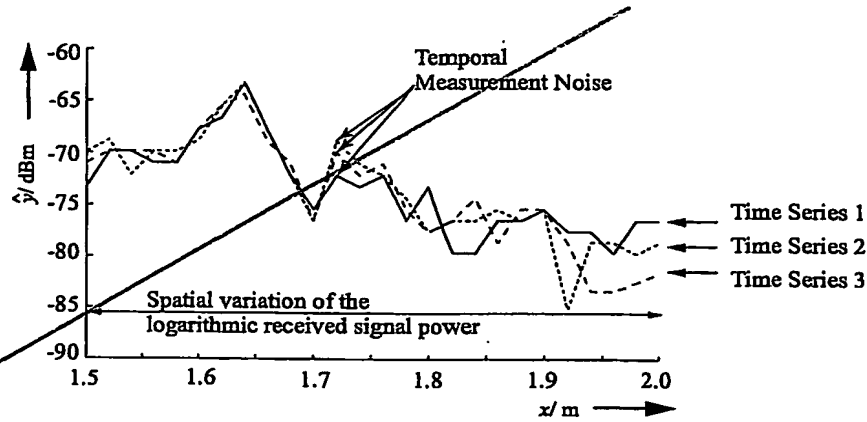


Figure 2. Spatial variations of the logarithmic received signal power over short distances and temporal measurement noise (three different time series).

### 3.2.1. Model uncertainties

In this localization approach, the deviation between the true logarithmic received signal power and the deterministic measurement model  $\hat{h}(\mathbf{x}_k)$  is described by a Gaussian noise density with mean  $\mu_{v,\zeta}^{(1)}$  and standard deviation  $\sigma_{v,\zeta}^{(1)}$  for each transmitter. This Gaussian uncertainty is a representation for the approximation error of the deterministic component of the measurement model over the whole localization environment. First, it represents the mean deviation over the localization environment between the model and the true received power, because of incorrect assumptions for the deterministic part of the measurement equation. The uncertainties resulting from large-scale deviations between the true received signal power and the measurement model are depicted in Fig. 1. Second, measurements have also shown that there exist local deviations, that might be caused by reflexion, non-homogenous propagation of the radio waves and interference. These spatial variations of the logarithmic received signal power can be seen in Fig. 2, where measurements have been collected with a distance of 2 cm.

### 3.2.2. Measurement noise

In addition to spatial variations of the received signal power, temporal measurement noise can be determined by analyzing a series of several different measurements at a fixed position. This temporal measurement noise is also shown in Fig. 2, for three different measurements of the logarithmic received signal power at each measurement position. This noise is again approximated by a Gaussian density with mean  $\mu_{v,\zeta}^{(2)}$  and standard deviation  $\sigma_{v,\zeta}^{(2)}$ .

### 3.2.3. Combination of model uncertainties and measurement noise

To obtain a simple model comprising both uncertainties described in 3.2.1 and 3.2.2, it is further assumed, that both uncertainties are independent. Therefore, they can be modeled by a single Gaussian density  $f_{v,\zeta}(v_\zeta)$  for each transmitter  $\zeta = 1, \dots, N$ , defined by the mean

$$\mu_{v,\zeta} = \mu_{v,\zeta}^{(1)} + \mu_{v,\zeta}^{(2)}$$

and the standard deviation

$$\sigma_{v,\zeta} = \sqrt{(\sigma_{v,\zeta}^{(1)})^2 + (\sigma_{v,\zeta}^{(2)})^2}.$$

This model not only implies independent uncertainties, but it is also assumed that both uncertainties can be described without considering any position dependency.

#### 4. FILTERING ALGORITHM

In this Section, a brief overview of the Prior Density Splitting Mixture Estimator (PDSME) used for the localization of radio communication devices is given. Additionally, an adaptation of the measurement equations  $h(\underline{x}_k)$  derived in Section 3 is introduced to simplify the calculation of the PDSME. Furthermore, a prediction step for a simple user model is presented.

##### 4.1. The PDSME measurement update

The PDSME algorithm for the localization of radio communication devices presented in this paper is based on the calculation of a linearized measurement update for Gaussian mixture densities. The measurement update step of this filtering algorithm is shown in a block diagram in the upper part of Fig. 3. Splitting is based on the calculation of the linearization error

$$\mathcal{D}_2(\bar{f}_x^{e,i} \| f_x^{e,i}) = \int_{\mathbb{R}^2} \bar{f}_x^{e,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_{k,\zeta}) \left( \ln \left( \frac{\bar{f}_x^{e,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_{k,\zeta})}{f_x^{e,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_{k,\zeta})} \right) \right)^2 d\underline{x}_k \quad (4)$$

for each component of the posterior Gaussian mixture density. This criterion is very similar to the Kullback-Leibler distance<sup>14</sup>

$$\mathcal{D}(\bar{f}_x^{e,i} \| f_x^{e,i}) = \int_{\mathbb{R}^2} \bar{f}_x^{e,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_{k,\zeta}) \ln \left( \frac{\bar{f}_x^{e,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_{k,\zeta})}{f_x^{e,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_{k,\zeta})} \right) d\underline{x}_k$$

between the exact posterior density  $f_x^{e,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_{k,\zeta})$  and its approximation  $\bar{f}_x^{e,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_{k,\zeta})$  by replacing the nonlinear measurement equation  $h(\underline{x}_k)$  by its linearization  $\bar{h}(\underline{x}_k)$  at the mean of the  $i$ -th component of the prior density function. Calculating the linearization error (4), the prior Gaussian mixture components which contribute most to the approximation error of the posterior density are identified. To reduce this linearization error, these Gaussian mixture components are replaced by splitting them into several mixture components with smaller covariances using splitting libraries, which have been optimized off-line (see Fig. 4 in<sup>15</sup>). [26]

After this "analytic resampling" of the prior density, the filter step can be calculated by a bank of EKF's, linearizing the measurement equation at the mean of each component of the Gaussian mixture representation of the prior density.

Afterwards, a merging step reduces redundancy by combining several Gaussian mixture components to a single Gaussian with negligible approximation error.

##### 4.2. Adaptation of the measurement model for simplifications of the linearization error criterion

For Gaussian measurement noise, the linearization error (4) can be calculated analytically as a linear combination of moments of the density  $\bar{f}_x^{e,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_{k,\zeta})$  for polynomial measurement equations  $h_\zeta(\underline{x}_k)$ . Therefore, in this Subsection, an adaptation of the measurement equation (3) is derived. After some algebraic conversions, the squared measurement equation

$$\underbrace{(\hat{y}_{k,\zeta} - \Delta_\zeta)^2}_{= \hat{z}_{k,\zeta}} = \|\underline{x}_k - \underline{m}_\zeta\|_{\mathbf{P}_\zeta^{-1}}^2 + \underbrace{(2(\hat{y}_{k,\zeta} - \Delta_\zeta)v_\zeta - v_\zeta^2)}_{= \hat{v}_\zeta} \quad (5)$$

can be re-written as a polynomial function with a modified "measured value"  $\hat{z}_{k,\zeta}$  and the transformed uncertainty  $\hat{v}_\zeta$ . Because of the nonlinear transformation of the random variable  $v_\zeta$ , the probability density function  $f_{\hat{v}_\zeta}(\hat{v}_\zeta)$  is no longer Gaussian. In the localization experiment in Section 5, the exact first and second order moments of  $\hat{v}_\zeta$  are computed to determine a Gaussian approximation of  $f_{\hat{v}_\zeta}(\hat{v}_\zeta)$ . Note, that the moments of  $\hat{v}_\zeta$  are depending upon the measured value  $\hat{y}_{k,\zeta}$ . Therefore, they have to be re-computed for each new measurement of the logarithmic received signal power and are not time-invariant as the parameters  $\mu_{v,\zeta}$  and  $\sigma_{v,\zeta}$  described in Section 3.

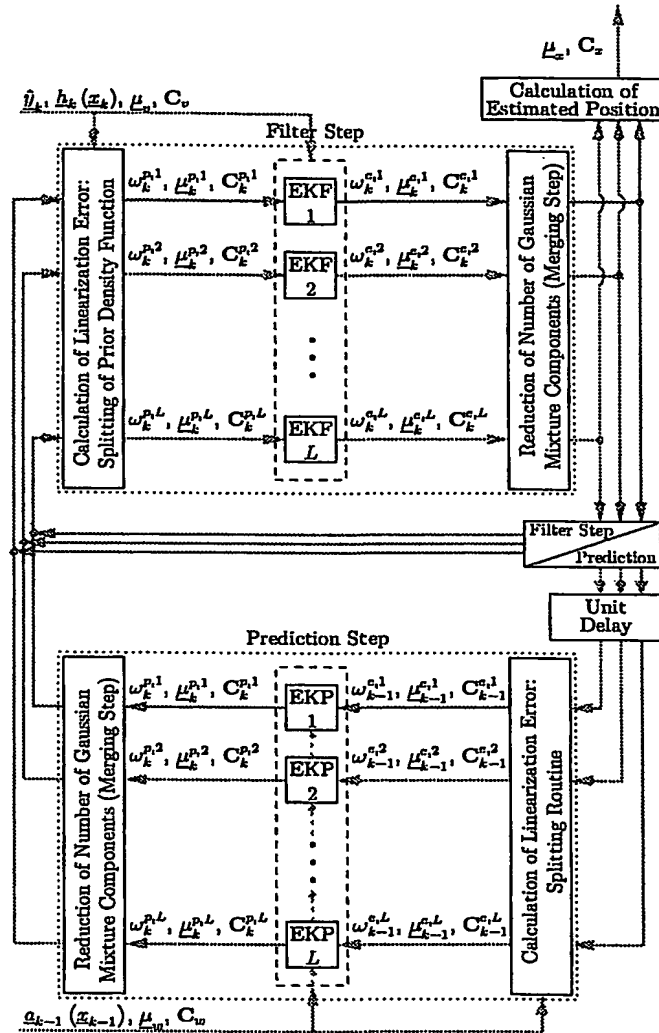


Figure 3. Overview of the PDSME algorithm: The PDSME consists of a linearized filter step (upper part) and linearized prediction step (lower part).

#### 4.3. User modeling by PDSME prediction step

Similarly to the filter step, the PDSME can also be applied to the calculation of nonlinear prediction steps. Analogously to nonlinear filter steps, the calculation of an approximated prediction step also consists of the evaluation of a linearization error, a bank of linearized prediction steps and the reduction of the number of Gaussian mixture components in a merging step (see the lower part of Fig. 3). In this paper, only a linear user model is considered. Therefore, the prediction step can be calculated analytically, since the posterior density has been approximated by a Gaussian mixture density in the filter step.

The prediction model consists of the linear state equation

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + \underline{w}_k ,$$

where the mean  $\mu_w$  of the additive system noise  $w_k$  represents knowledge about possible *directions* and *mean step lengths* of the user's movement. The covariance matrix  $C_w$  of  $w_k$  specifies an estimate for the distribution of the user's *step lengths*. For each component  $i = 1, \dots, L$  of the Gaussian mixture density, the predicted Gaussian mixture component is then described by the mean

$$\mu_{k+1}^i = \mu_k^i + \mu_w$$

and the covariance

$$C_{k+1}^i = C_k^i + C_w$$

The estimated position can then be calculated as a weighted superposition

$$\frac{\sum_{i=1}^L \omega_{k+1}^i \mu_{k+1}^i}{\sum_{i=1}^L \omega_{k+1}^i}$$

of the means of all Gaussian mixture components.

Tel 2:

## 5. LOCALIZATION EXPERIMENT

In this Section, a real-world localization experiment is presented for the validation of the described localization approach for DECT mobile telephones. In the Subsections 5.2 and 5.3, the superior performance of the PDSME compared to the Extended Kalman Filter (EKF),<sup>16</sup> a widely used standard approach for the state estimation of nonlinear systems, is shown.

### 5.1. Evaluation scenario

In this localization experiment,  $N = 10$  transmitters have been placed in an indoor area of approximately  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  in one floor of a building. In the model generation phase, the logarithmic received signal power of each transmitter has been measured on a grid with  $1\text{ m}$  distance between grid points.  $N = 10$  measurement equations  $h_c(\underline{x}_k)$ , altogether consisting of 60 parameters for the deterministic components and 20 parameters for the stochastic components  $\underline{v}_k$ , have been identified. Except for a few areas, influenced by high attenuation of the radio waves because of ferroconcrete walls, the assumed model is an appropriate approximation of the distribution of the received signal power.

The initial probability density of the position is chosen as a Gaussian density with the initial mean

$$\mu_0^p = \begin{bmatrix} 15\text{ m} \\ 15\text{ m} \end{bmatrix}$$

and the initial covariance

$$C_0^p = \begin{bmatrix} 15^2 & 0 \\ 0 & 15^2 \end{bmatrix} \text{ m}^2,$$

i.e., almost no prior knowledge about the position is available.

In the localization phase, a measurement of each receivable transmitter is collected along a line as shown in Fig. 4, with a distance of  $\Delta\tau = 0.5\text{ m}$  between the true measurement positions  $P_1, P_2, \dots, P_{17}$ . The position coordinates of the measurements have been determined to compare the ground truth to the estimated positions. Neither in the localization approach by the PDSME nor by the EKF, the exact measurement positions have been used for the localization of the receiver. After the measurement update has been calculated for each receivable transmitter in a fixed position  $P_i, i = 1, \dots, 17$ , a prediction step according to Subsection 4.3 has been calculated. In this example, the simple user model is defined by the mean

$$\mu_w = \underline{0}\text{ m}$$

and the covariance

$$C_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ m}^2,$$

i.e., no knowledge about a preferred direction of the motion of the user is available. Only the distribution of the user's step lengths is represented by the covariance matrix  $C_w$ .

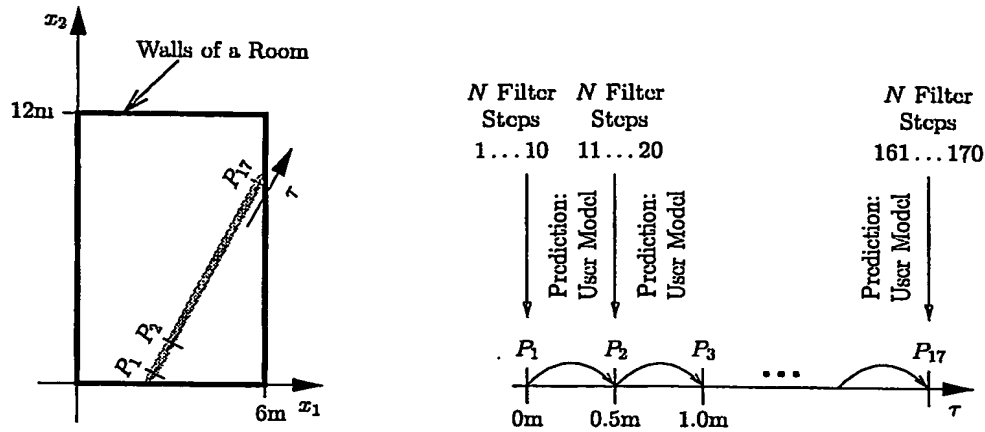


Figure 4. Evaluation scenario of the localization experiment.

## 5.2. Extended Kalman Filter (EKF)

Using the EKF, the measurement equation (5) is linearized at the mean of the prior density function. In Fig. 5, the results of the EKF are presented for the first and the 170th filter step. In each filter step, the measurement of the logarithmic received signal power of a single transmitter is used to update the estimated position.

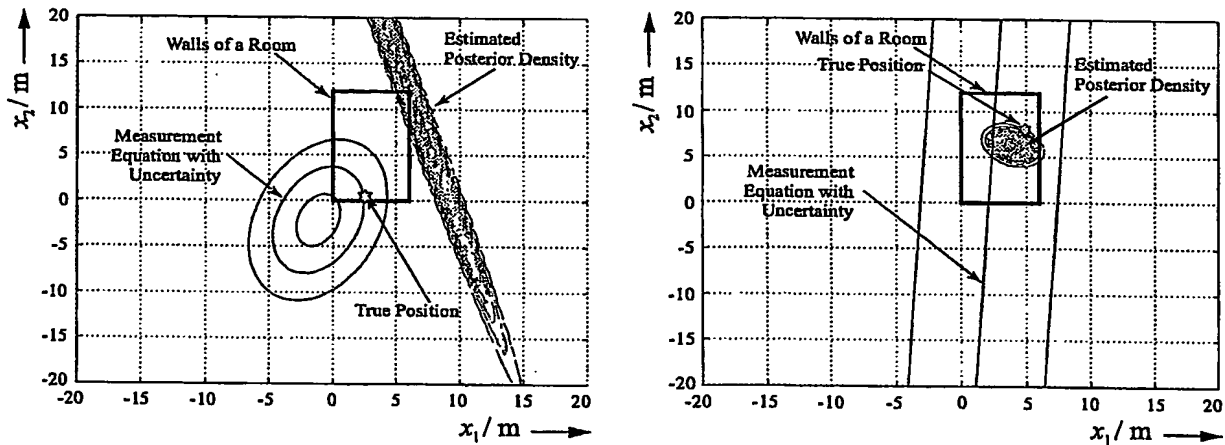


Figure 5. Localization with the EKF: First filter step (left) and 170th filter step (right).

It can be noticed, that there is a significant estimation error after the first filter step. The true position of the receiver is not within the support of the estimated posterior density function depicted by its contour plot. Furthermore, there is no intersection between the true measurement equation and the estimated density. Therefore, it is not possible to apply data validation techniques to find out whether a measured value can be "explained" by the estimated density.

### 5.3. Prior Density Splitting Mixture Estimator (PDSME)

In Fig. 6, the posterior densities estimated by the PDSME algorithm are also shown for the first and 170th filter step. Obviously, the approximation of the non-Gaussian posterior density in the first filter step, which is very close to the numerically calculated optimal Bayesian solution of the filter step, is much better than in the case of the EKF. Hence, data validation techniques can now be successfully applied.

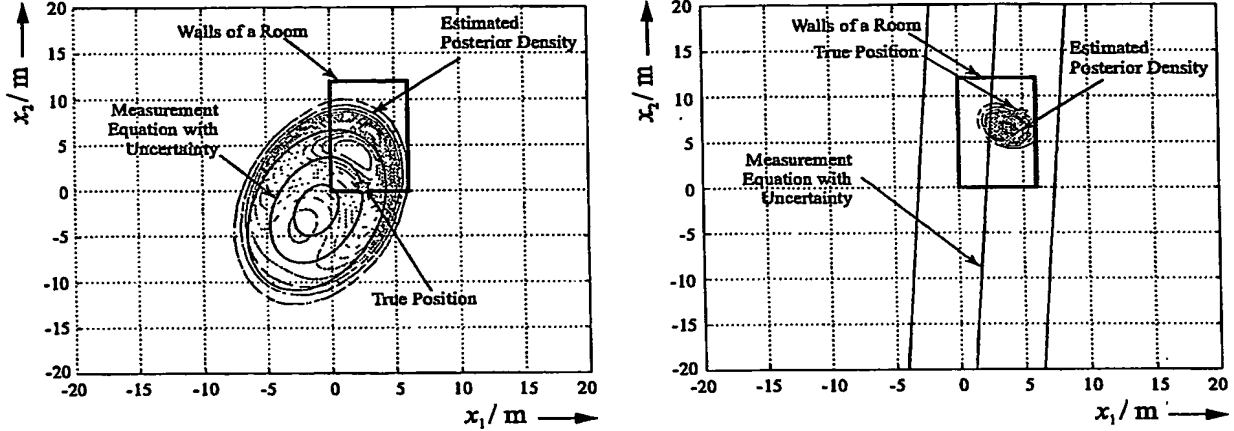


Figure 6. Localization with the PDSME: First filter step (left) and 170th filter step (right).

In Fig. 7, the expected values of the posterior density functions calculated by the EKF and the PDSME are compared to the true position. Comparing this figure to Fig. 8, it can be seen, that for almost linear filtering problems, i.e., if the covariance of the estimated position is small compared to the nonlinearity of the measurement equation after several filter steps, the EKF and the PDSME yield almost the same results. In these cases, the PDSME only uses a moderate number of Gaussian mixture components, whereas for strong nonlinearities at the beginning of the localization experiment a higher number of approximation components is necessary to reduce the estimation error. The superior performance of the PDSME compared to the EKF is also shown by the average estimation error

$$\frac{1}{N_F} \sum_{k=1}^{N_F} \sqrt{\|x_k^{true} - x_k^{estimated}\|_2^2}$$

over the  $N_F = 170$  filter steps, which is 3.30 m for the EKF and 1.22 m for the PDSME.

## 6. CONCLUSIONS

In this paper, a stochastic approach for the localization of radio communication devices has been presented, which is based on measuring the logarithmic signal power of the receivable transmitters by a mobile part. A stochastic measurement model, consisting of a deterministic and a stochastic component has been identified for each transmitter. This measurement model has been used for the estimation of the position of the receiver by a novel Gaussian mixture estimator, which is based on splitting the prior density according to a linearization error criterion. This criterion is very similar to the Kullback-Leibler distance between the true and the approximated posterior density, calculated by a linearization of the measurement equation. Applying this estimation technique to the localization of DECT mobile telephones, significant improvements of the estimation quality can be achieved, if the PDSME is used instead of standard approaches like the EKF. Further improvement of the localization quality can be achieved by identifying better deterministic measurement models and more precise characterizations of the measurement noise, which do not assume independence between the different uncertainties mentioned in this paper.

24 30-

In diesem Dokument sind folgende Schriften zitiert:

- 5 [1] Rappaport T.S., Reed J.H. et al., „Position Location Using Wireless Communications on Highways of the Future“, IEEE Communication Magazine, S. 33 - 41, Okt. 1996.
- [2] DE 198 36 778 A1
- 10 [3] TS 25.305 V3.1.0: stage 2 "Functional Specification of Location Services in UTRAN" (release 99), 3GPP TSG-RAN-WG2, 2000
- [4] United States Patent, Patent Number 5,883,598
- 15 [5] United States Patent, Patent Number 6,094,168
- [6] United States Patent, Patent Number 6,108,553
- 20 [7] Eberspächer, J.; Vögel, H.-J.: GSM. Global System for Mobile Communication. Stuttgart, Leipzig: Teubner, 1999
- [8] Jung. P.: Analyse und Entwurf digitaler Mobilfunksysteme. Stuttgart, Leipzig: Teubner, 1997
- 25 [9] Kennemann, O.: Lokalisierung von Mobilstationen anhand ihrer Funkmessdaten. Nummer 11 in Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation. Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1997.
- 30 [10] Rauh Andreas, "Nonlinear Measurement Update And Prediction: PRIOR DENSITY SPLITTING MIXTURE ESTIMATOR", submitted to IEEE Transactions on Automatic Control, Dezember 2002;
- 35 [11] The Digital Cordless Telecommunications Standard for the World, erhältlich am 24.04.2003 unter:

25-31-

<http://www.dectweb.com/dectforum/aboutdect/aboutdect.htm>

- 5 [12] T. Roos, P. Myllymäki, and H. Tirri, "A Statistical Modeling Approach to Location Estimation", IEEE Transactions on Mobile Computing 1, pp. 59-69, January-March 2002
- 10 [13] A. M. Ladd, K. E. Bekris, G. Marceau, A. Rudys, D. S. Wallach, and L. E. Kavraki, "Using Wireless Ethernet for Localization", in Proceedings of the 2002 IEEE/RSN Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 402-408, EPFL, (Lausanne, Switzerland), October 2002.
- 15 [14] J. C. Chen, R. E. Hudson, and K. Yao, "Maximum-Likelihood Source Localization and Unknown Sensor Location Estimation for Wideband Signals in the Near-Field", IEEE Transaction on Signal Processing 50, August 2002.
- 20 [15] N. Bergmann, L. Ljung, and F. Gustafsson, "Terrain Navigation Using Bayesian Statistics", IEEE Control Systems Magazine 19, pp. 33-40, June 1999.
- 25 [16] N. Bergmann, Recursive Bayesian Estimation: Navigation and Tracking Applications. PhD thesis, Linköping University, Department of Electrical Engineering, 1999.
- 30 [17] S. Panzieri, F. Pascucci, and G. Ulivi, "An Outdoor Navigation System Using GPS and Inertial Platform", IEEE/ASME Transaction on Mechatronics 7, pp. 134-142, June 2002.
- [18] B. H. Fleury and P. E. Leuthol, "Radiowave Propagation in Mobile Communications: An Overview of European Re-



28 - 32 -

search," IEEE Communication Magazine 23(2), pp. 70-81, 1996.

5 [19] K. Ito and K. Xiong, "Gaussian Filters for Nonlinear Filtering Problems," IEEE Transactions on Automatic Control 45, pp. 910-927, May 2000.

10 [20] D. Alspace and H. Sorenson, "Nonlinear Bayesian estimation using Gaussian sum approximations," IEEE Transactions on Automatic Control 17, pp. 439-448, 1972

15 [21] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems", Trans. ASME, J. Basic Eng. Series 82D, pp. 35-45, 1960.

[22] F. C. Schweppe, Uncertain Dynamic Systems, Prentice-Hall, New York, 1973.

20 [23] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, McGraw-Hill, Tokyo, 1965.

25 [24] J. Lähteenmäki, "Radiowave Propagation in Office Buildings and Underground Halls", in Proc. 22<sup>nd</sup> European Microwave Conference EurMC'92, pp. 377-382 (Espoo, Finland), 1992.

30 [25] S. Kullback and R. A. Leibler, "On Information and Sufficiency", Annals of Mathematical Statistics 22, pp. 79-86, 1951.

35 [26] U. D. Hanebeck, K. Briechle, and A. Rauh, "Progressive Bayes: A New Framework for Nonlinear State Estimation," in Proceedings of SPIE AeroSense Symposium, 5099, (Orlando, Florida), April 2003.

27 - 33 -

- [27] M. Hellebrandt and R. Mathar, "Location Tracking of Mobiles in Cellular Radio Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology 48, pp. 1558-1562, September 1999.

28-34-

**Patentansprüche**

1. Verfahren zur Ermittlung einer ausgewählten Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz mit mindestens einer ersten Basisstation, eingerichtet zu einer ersten Kommunikation mit der mobilen Kommunikationseinrichtung mittels erster Kommunikationssignale, unter Verwendung eines nichtlinearen Kommunikationsmodells mit einem deterministischen Anteil und einem stochastischen Anteil,

- welcher deterministische Anteil eine Abhängigkeit zwischen Kommunikationssignale einer Basisstation und Positionen der mobilen Kommunikationseinrichtung beschreibt und
- welcher stochastische Anteil eine Unsicherheit des deterministischen Anteils beschreibt,
- bei dem unter Verwendung des zu der ausgewählten Position zugehörigen ersten Kommunikationssignals der ersten Basisstation und dem nicht-linearen Kommunikationsmodell die ausgewählte Position ermittelt wird,
- wobei bei der Ermittlung eine nichtlineare Bayesianische Filtertechnik angewandt wird, wodurch ein mögliches Aufenthaltsgebiet der ausgewählten Position bestimmt wird, aus welchem die ausgewählte Position ermittelt wird.

25

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem mindestens eine zweite Basisstation, eingerichtet zu einer zweiten Kommunikation mit der mobilen Kommunikationseinrichtung mittels zweiter Kommunikationssignale, verwendet wird, wobei unter Verwendung des zu der ausgewählten Position zugehörigen ersten Kommunikationssignals und/oder des zu der ausgewählten Position zugehörigen zweiten Kommunikationssignals und dem nicht-linearen Kommunikationsmodells die ausgewählte Position ermittelt wird.

35

~~28~~ - 35 -

3.Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,

bei dem unter Verwendung des ersten und/oder des zweiten Kommunikationssignals ein und/oder mehrere entfernungsabhängige Parameter ermittelt werden bzw. wird, welche bzw. welcher von einer Entfernung der mobilen Kommunikationseinrichtung zu einer von den Basisstationen abhängen bzw. abhängt und unter Verwendung dessen oder derer das mögliche Aufenthaltsgebiet ermittelt werden bzw. wird.

10 4.Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
bei dem die Unsicherheit des deterministischen Anteils eine Unsicherheit der Kommunikationssignale, insbesondere ein Messrauschen, und/oder eine Unsicherheit der Abhängigkeit, insbesondere eine Unsicherheit des Kommunikationsmodells,  
15 sind bzw. ist.

5.Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
bei dem das zu der ausgewählten Position zugehörige erste Kommunikationssignal zeitabhängig ist und/oder für einen  
20 Zeitpunkt  $k$  gemessen wird.

6.Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
bei dem die nichtlineare Bayesianische Filtertechnik iterativ angewandt wird.

25

7.Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
bei dem als die nichtlineare Bayesianische Filtertechnik ein Gausscher Mischfilter-Algorithmus oder ein Kalman Filter, insbesondere ein Extended Kalman Filter, verwendet wird.

30

8.Verfahren nach Anspruch 7,  
bei dem der Gaussche Mischfilter-Algorithmus ein Prior Density Splitting Mixture Estimator (PDSME) ist.

35 9.Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,

~~30~~ - 36 -

bei dem ein Benutzermodell verwendet wird, welches eine Bewegung der mobilen Kommunikationseinrichtung beschreibt.

10. Verfahren nach Anspruch 9,

- 5 bei dem unter Verwendung des Benutzermodells die Bewegung der mobilen Kommunikationseinrichtung für einen Zeitschritt begrenzt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10,

- 10 bei dem unter Verwendung des Benutzermodells eine Positionsschätzung für die ausgewählte Position ermittelt wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11,

- 15 bei dem die Positionsschätzung unter Anwendung der nichtlinearen Bayesianischen Filtertechnik ermittelt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12,

- 20 bei dem die Positionsschätzung als ein Startwert für die Ermittlung des möglichen Aufenthaltsgebiet der ausgewählten Position durch die Anwendung der nichtlinearen Bayesianischen Filtertechnik verwendet wird.

14. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,

- 25 bei dem das Kommunikationsnetz ein WLAN-, GSM- oder DECT-Netz ist.

15. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,

- 30 bei dem als ausgewählte Position der mobilen Kommunikationseinrichtung ein Kennwert des möglichen Aufenthaltsgebiets, insbesondere ein Schwerpunkt oder ein Erwartungswert des möglichen Aufenthaltsgebiets, verwendet wird.

16. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,

34 - 37 -

eingesetzt zur Lokalisierung eines Mobiltelefons in einem digitalen, zellularen Mobilfunknetz, insbesondere in einem GSM-Netz,

- 5 wobei die mobile Kommunikationseinrichtung das Mobiltelefon, die erste Basisstation eine gesprächsführende Basisstation in dem Mobilfunknetz ist.

10 17. Anordnung zur Ermittlung einer ausgewählten Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz mit mindestens einer ersten Basisstation, eingerichtet zu einer ersten Kommunikation mit der mobilen Kommunikationseinrichtung mittels erster Kommunikationssignale, unter Verwendung eines nichtlinearen Kommunikationsmodells mit einem deterministischen Anteil und einem stochastischen Anteil,

- 15 - welcher deterministische Anteil eine Abhängigkeit zwischen Kommunikationssignale einer Basisstation und Positionen der mobilen Kommunikationseinrichtung beschreibt und
- 20 - welcher stochastische Anteil eine Unsicherheit des deterministischen Anteils beschreibt,
- mit einer Positionsermittlungseinheit, die derart eingerichtet ist, dass unter Verwendung des zu der ausgewählten Position zugehörigen ersten Kommunikationssignals der ersten Basisstation und dem nicht-linearen Kommunikationsmodell die ausgewählte Position ermittelbar ist,
- 25 - wobei bei der Ermittlung eine nichtlineare Bayesianische Filtertechnik angewandt wird, wodurch ein mögliches Aufenthaltsgebiet der ausgewählten Position bestimmt wird,
- 30 aus welchem die ausgewählte Position ermittelt wird.

18. Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln, um alle Schritte gemäß Anspruch 1 durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird.

~~32~~ - 38 -

19. Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln gemäß Anspruch 18, die auf einem computerlesbaren Datenträger gespeichert sind.

- 5 20. Computerprogramm-Produkt mit auf einem maschinenlesbaren Träger gespeicherten Programmcode-Mitteln, um alle Schritte gemäß Anspruch 1 durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird.

38 - 39 -

### Zusammenfassung

Verfahren und Anordnung sowie Computerprogramm mit Programm-  
code-Mitteln und Computerprogramm-Produkt zur Ermittlung ei-  
5 ner ausgewählten Position einer mobilen Kommunikationsein-  
richtung in einem Kommunikationsnetz

Die Erfindung betrifft eine Ermittlung einer Position einer  
mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz  
10 (Lokalisierung).

Dazu werden aus Kommunikationssignalen einer Basisstation,  
welche mit der mobilen Kommunikationseinrichtung in dem Kom-  
munikationsnetz in einer Kommunikation steht, unter Verwen-  
15 dung eines nichtlinearen Kommunikationsmodell mittels einer  
nichtlinearen Bayesianischen Filterung ein mögliches Aufent-  
haltsgebiet für die mobile Kommunikationseinrichtung ermit-  
telt. Aus dieser wird dann die ausgewählte Position der mobi-  
len Kommunikationseinrichtung bestimmt.

20 Sign. Fig.3



Fig. 1

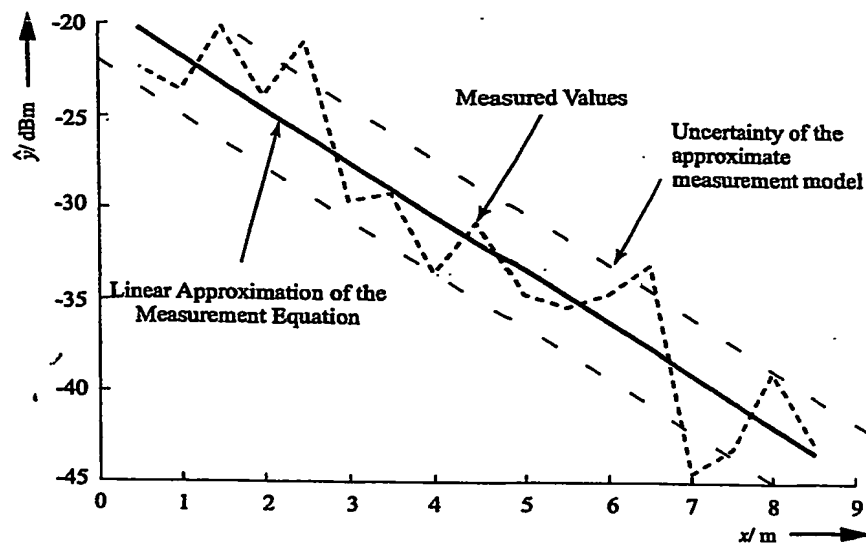


Fig. 2

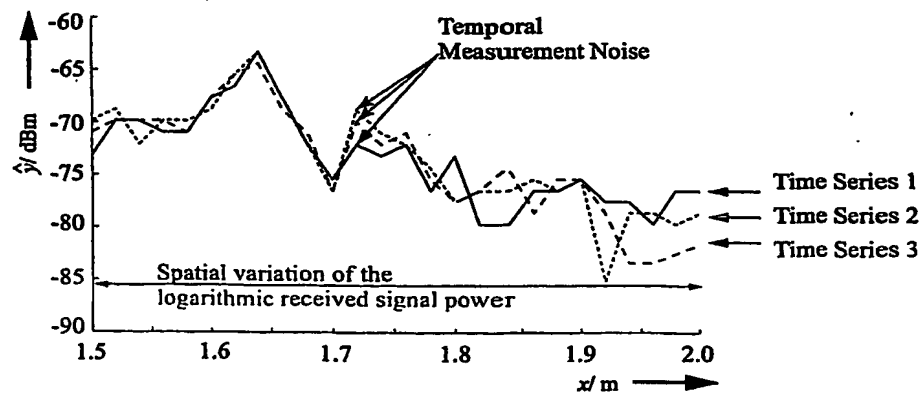


Fig. 3

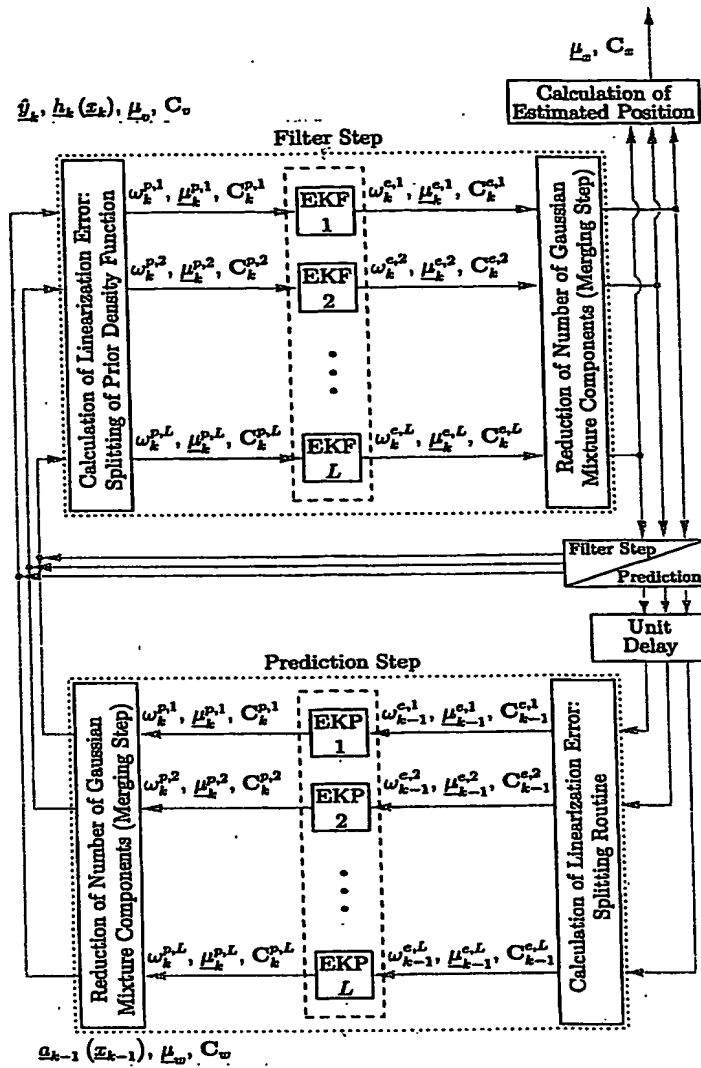
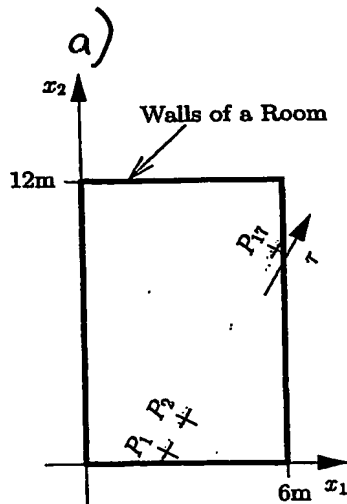


Fig. 4



b)

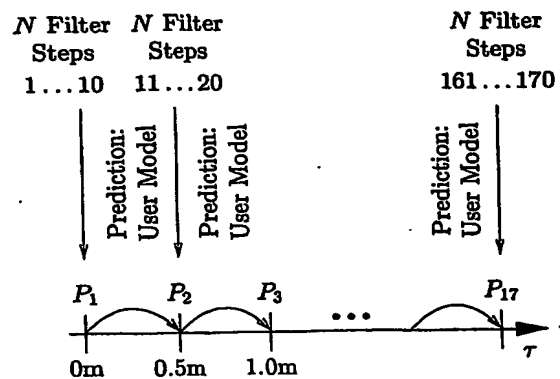


Fig. 5

2003P05965

-3-

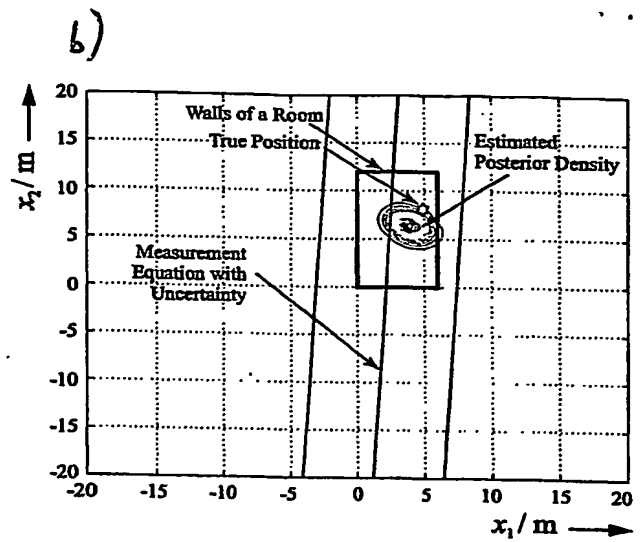
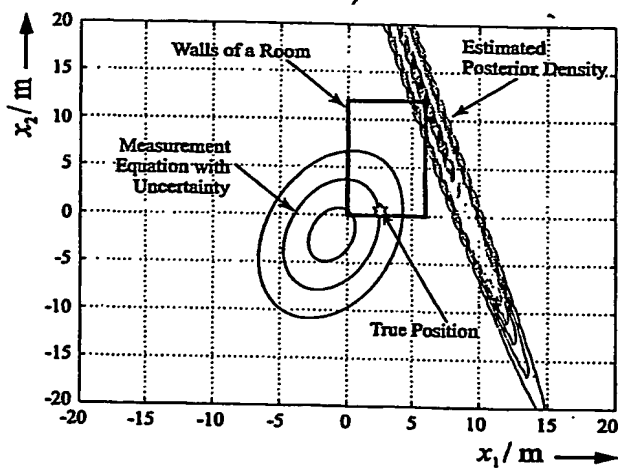


Fig. 6

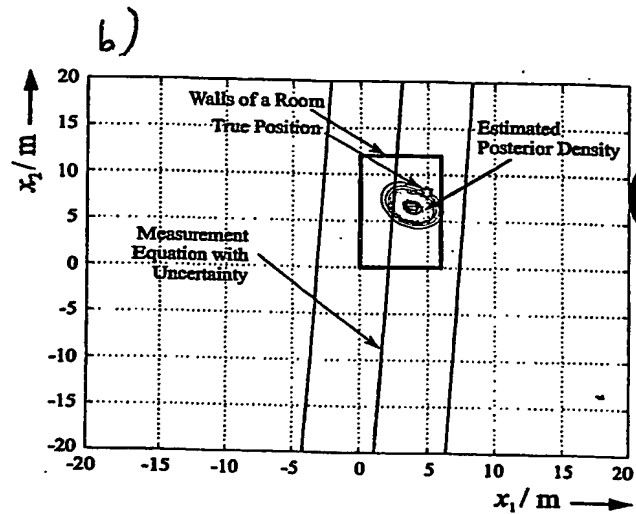
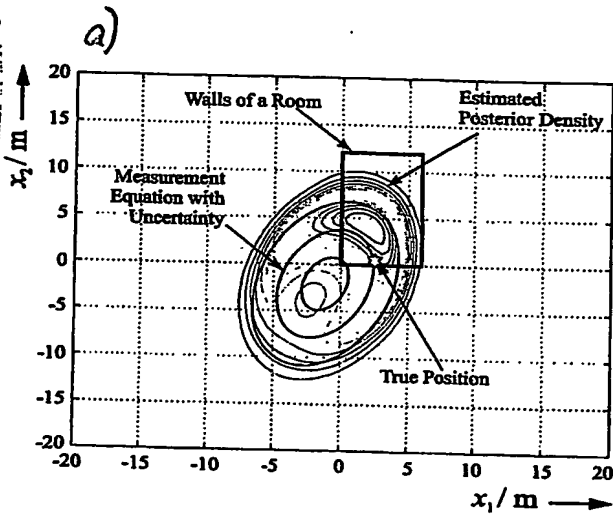


Fig. 7

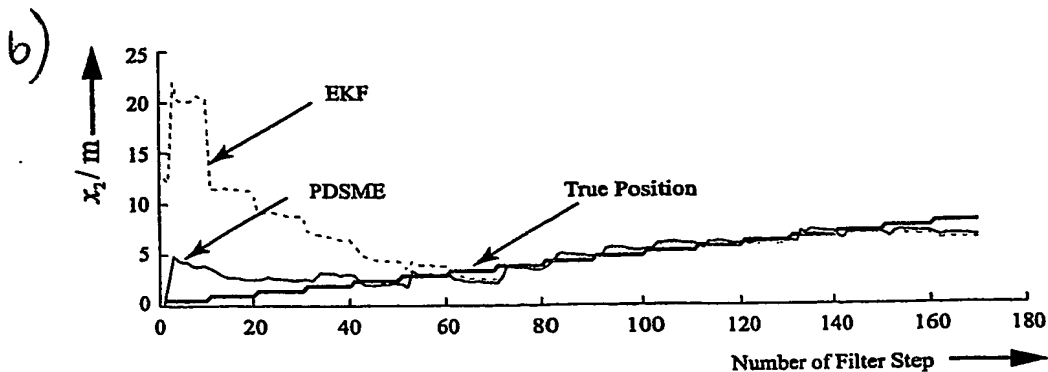
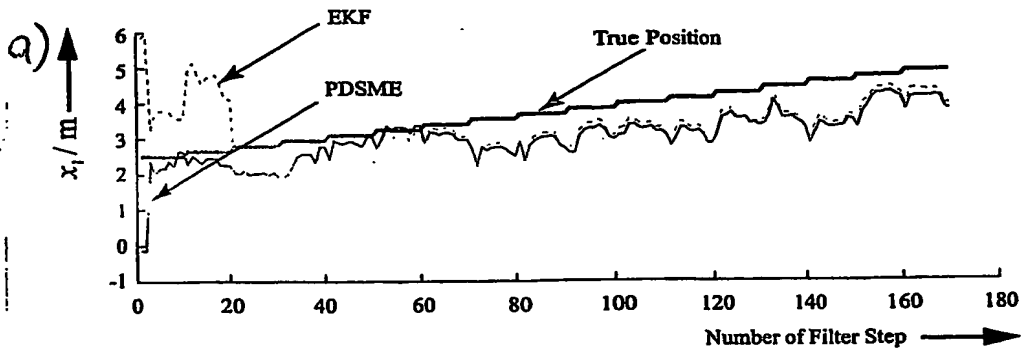
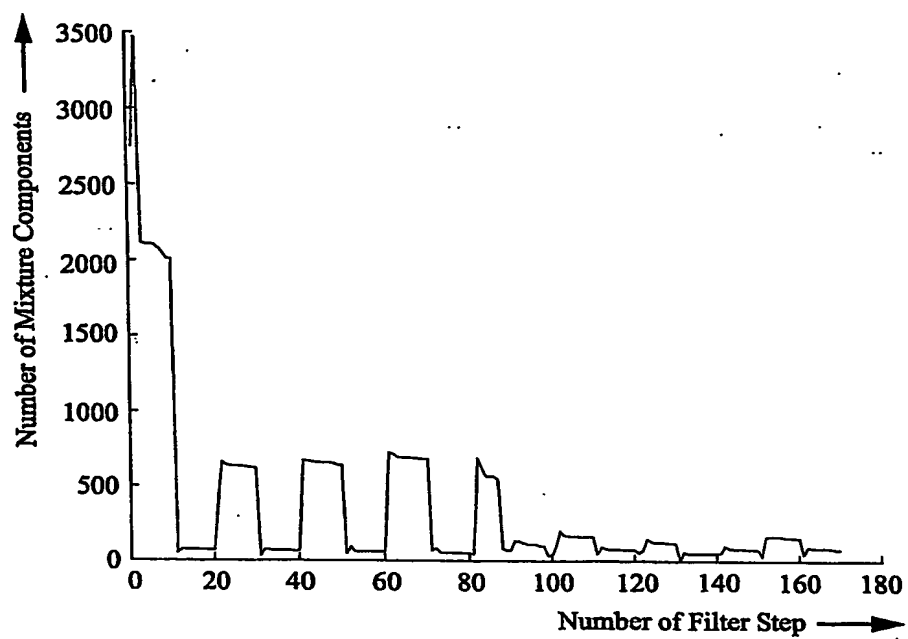


Fig. 8



EP000403320



This Page is inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record

## BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ BLACK BORDERS
- ☒ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☒ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLORED OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REPERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images  
problems checked, please do not report the  
problems to the IFW Image Problem Mailbox**